

文章编号:1001-5078(2007)09-0801-05

国外非制冷红外焦平面阵列探测器进展

雷亚贵,王戎瑞,陈苗海
(华北光电技术研究所,北京 100015)

摘要:非制冷红外焦平面阵列探测器是目前发展最为迅速的红外探测器种类之一,并已广泛渗透到军事和民事应用中。本文重点阐述几种国外具有代表性的非制冷红外焦平面探测器的现状及其发展趋势。

关键词:非制冷红外探测器;红外焦平面阵列;微测辐射热计;微悬臂梁红外探测器

中图分类号:TN215 **文献标识码:**A

Development of Foreign Uncooled IRFPA Detectors

LEI Ya-gui, WANG Rong-rui, CHEN Miao-hai
(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: Uncooled infrared detector is one type of the most fast evolved infrared detectors and has wide military and civilian applications. In the paper, the statement is focused on the state of art and trend of several foreign representative uncooled infrared detectors development.

Key words: uncooled infrared detector; infrared focal plane array; microbolometer; microcantilever detector

1 引言

由于应用需求的牵引,红外焦平面阵列(IRFPA)探测器技术已发展到第三代水平,其中非制冷IRFPA探测器发展迅速,虽然目前的性能尚不及制冷型光子探测器那样好,但其能够工作在室温状态下,并具有质量轻、体积小、寿命长、成本低、功耗小、启动快及稳定性好等优点,满足了民用红外系统和部分军事红外系统对长波红外探测器的迫切需要。事实表明,采用非制冷IRFPA探测器的轻型红外热像仪系统逐渐增多,其中采用的规格主要有 160×120 元、 256×128 元和 320×240 元等。一些较大规格如 640×480 元氧化钒(VO_x)非制冷红外探测器也得到少量装备和应用,如美国DRS公司已在其小型常平架的传感器中采用了型号为U6000的 640×480 元 VO_x 非制冷IRFPA探测器。

非制冷红外探测器主要包括测辐射热计、热电(或铁电)探测器和热电堆探测器,其中微测辐射热计和铁电红外探测器生产量所占市场份额较大,而前者比后者的灵敏度高很多,并保持上升势头^[1]。本文着重阐述典型非制冷IRFPA探测器——微测辐射热计的发展状况,同时也介绍了近年出现的一些新型非制冷IRFPA探测器技术,如硅-绝缘体(SOI)二极管非制冷IRFPA探测器、双材料微悬臂梁非制冷IRFPA探测器、利用热光效应的非制冷IRFPA探测器等。

2 微测辐射热计进展

微测辐射热计的工作原理是温度变化引起材料

作者简介:雷亚贵(1970-),女,硕士,高级工程师,主要从事信息技术工作。E-mail:lyg5145@sina.com

收稿日期:2007-06-27

电阻变化,其种类较多,应用也最广泛,包括 VO_x , a-Si 以及 YBaCuO , 其中 VO_x 和 a-Si 是主流产品。

2.1 VO_x

VO_x 的电阻温度系数 (TCR) 较高 (一般为 2% ~ 3%/K), 是目前首选的非制冷红外 FPA 探测器。美国 BAE 公司、Raytheon 公司、DRS 公司、Indigo 系统公司、日本的 NEC 以及以色列的 SCD 公司等单位都能生产 $160 \times 120 \sim 640 \times 480$ 元 VO_x 非制冷 IRFPA 探测器, 噪声等效温差 (NETD) 为 20 ~ 100mK。目前, 美国 BAE 和 DRS 已经在进行大规格 1024×1024 元非制冷 IRFPA 探测器的研究。

为提高分辨率, 在同等面积上增加像元数目可使像元尺寸减小, 导致灵敏度降低, 因此要最大限度地提高光学吸收和隔热性能。美国 Raytheon 公司采用了独特的双层结构提高隔热和增加光学填充因子, 如图 1 所示^[2-3]。图 1(a) 为像元间距为 $50\mu\text{m}$ 的像元结构; 图 1(b) 为 Raytheon 公司的双层结构, 像元间距为 $25\mu\text{m}$ 。采用这种结构得到的填充因子大于 70%, 光吸收效率大于 80%。这种新技术已经用于 $25\mu\text{m}$ 320×240 元和 640×512 元 IRFPA 的生产。目前 Raytheon 公司正在研制 $20\mu\text{m}$ 640×512 元 IRFPA (SB-300), 使其性能与 $25\mu\text{m}$ 阵列相当^[3]。

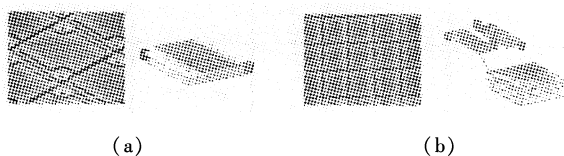


图 1 单层结构和双层结构

在中波红外微测辐射热计研究方面, Raytheon 公司正在开发像元间距 $50\mu\text{m}$ 的 320×240 元 VO_x 非制冷红外探测器。

日本 NEC 公司于 2003 年就研制出 320×240 元 VO_x 微测辐射热计, 填充因子达到 72%, 光吸收率为 80%。2004 年, 在原有像元结构的基础上, 增加了新结构——双弯曲臂和屋檐结构, 如图 2 所示。双弯曲臂加长使热导减少了一半, 隔热性能提高, 但却减小了填充因子, 所以在像元上方加屋檐结构 (可用 SiN 材料), 重新吸收部分反射光, 填充因子很容易达到 90% 以上^[4]。NEC 的这种新的像元结构也可应用于高分辨率 640×512 元非制冷 IRFPA 的研制。

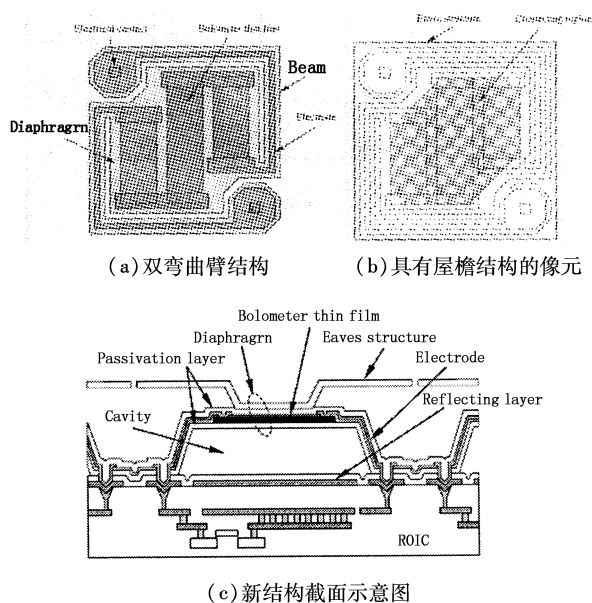


图 2 NEC 公司改进的像元结构图

VO_x 虽然目前依然是微测辐射热计中使用最多的材料, 但其最大的缺点就是不能与标准硅集成电路工艺兼容。

2.2 a-Si (非晶硅)

非晶硅的 TCR (4%/K) 与 VO_x 的相当, 也是一种具有前途的微测辐射热计材料。其优点是可与标准硅工艺完全兼容, 可制作较大规格的阵列探测器, 大幅降低系统尺寸和成本。但是由于非晶硅是无定形结构, 呈现的 $1/f$ 噪声比 VO_x 要高。

法国非制冷红外探测器研究机构主要是在法国原子能委员会与信息技术实验室/红外实验室 (CEA-LETI/LIR), 从 1992 年就开始研究 a-Si 探测器, 现已成熟。Sofradir 公司下属的 ULIS 公司负责将技术转化为大规模的生产。CEA-LETI/LIR 非晶硅制作技术与 VO_x 方法基本相同。ULIS 现在能够生产两种二代 320×240 元 a-Si IRFPA 探测器, 按照计划, 2005 已开始进行 640×480 ($25\mu\text{m}$) 探测器的研制, 但至今未见有详细报道。

美国 Raytheon 商用红外公司主要从事 a-Si 非制冷 IRFPA 探测器的生产。其 160×120 元非晶硅探测器结构中加入 Al 反射层, 这样衬底/读出电路和 Al 反射层之间形成 $1/4$ 波长共振腔, 能最大限度地吸收 $8 \sim 12\mu\text{m}$ 波段的红外光。具体产品及指标见表 1。

2.3 YBaCuO 非制冷 IRFPA 探测器

YBaCuO 光谱响应范围很宽 ($0.3 \sim 100\mu\text{m}$), 具

有比 VO_x 高的电阻温度系数(约 3.5%/K)以及较低的 $1/f$ 噪声,是一种比较引人注意的微测辐射热计探测器材料。日本 Mitsubishi 电子公司有首个像元间距为 $40\mu\text{m}$ 的 320×240 元样品出现。加拿大 INO 以及美国的 Southem Methodist 大学也在进行研究。由于 $YBaCuO$ 具有宽光谱响应范围,是将来多光谱应用的潜在材料。研究情况见表 1。

表 1 国外微测辐射热计和 SOI 二极管

IRFPA 的性能

公司名称	材料	规格	像元间距/ μm	主要参数	备注
Raytheon 视觉系统公司	VO_x	$640 \times 480/512$	25	NETD ($F/1, 30\text{Hz}$) = 20mK	生产
	VO_x	$640 \times 480/512$	20	NETD ($F/1, 30\text{Hz}$) $\leq 20\text{mK}$	SB - 300, 正在研制
	VO_x	320×240 ($8 \sim 14\mu\text{m}$)	25	NETD ($F/1, 60\text{Hz}$) < 100mK NETD ($F/1, 30\text{Hz}$) < 30mK	SB - 212, SB - 262 生产
	VO_x	320×240 ($3 \sim 5\mu\text{m}$)	50		正在研制
BAE 系统公司	VO_x	320×240	28	NETD < 50mK ($F/1$)	SIM500H, 生产
	VO_x	160×120	46	NETD < 50mK ($F/1$)	SIM500L, 生产
	VO_x	640×480	28		SIM500X, 生产
	VO_x	$640 \times 480/512$	25	NETD ($F/1, 30\text{Hz}$) = 55mK	正在研制
	VO_x	1024×1024	15	NETD = 50mK	
DRS 技术公司	VO_x	320×240 ($8 \sim 14\mu\text{m}$)	51	NETD ($F/1, 60\text{Hz}$) = 23 ~ 100mK	U3000, 生产, 300 套/月, 带热电制冷器
	VO_x	320×240		NETD ($F/1, 60\text{Hz}$) = 23mK	U4000, 生产
	VO_x	320×240	25.4		U7000 (目前称为 U3500), 生产
	VO_x	640×480	25.4		U6000, 生产, 100 套/月
	VO_x	1024×1024	15	NETD = 50mK	正在研究
以色列 SCD	VO_x	384×288 320×240	25	NETD < 50mK ($F/1, 60\text{Hz}$)	生产
	VO_x	160×120		Temperal NETD ~ 20mK ($F/1, 30\text{Hz}$)	已验证
NEC	VO_x	320×240	37	NETD < 100mK ($F/1, 60\text{Hz}$)	研究阶段
	VO_x	640×480	23.5	NETD = 50mK ($F/1, 30\text{Hz}$)	研究阶段

续表

公司名称	材料	规格	像元间距/ μm	主要参数	备注
Indigo 系统 (现在属于 FLIR 系统公司)	VO_x	160×120	51	NETD = 58mK ($F/1.6, 30\text{Hz}$) NETD = 23mK ($F/1, 30\text{Hz}$)	生产
	VO_x	320×120	38		生产
	VO_x	320×240	38		生产
	VO_x	640×512	25		正在研究
加拿大 INO	VO_x	160×120		NETD < 50mK	生产
	YBaCuO				正在研究
L-3 ITC	VO_x	640×480	25		正在研制
Sofradir/ULIS	a-Si	320×240	45	NETD < 80mK ($F/1, 25\text{Hz}$)	生产
	a-Si	320×240	35	NETD = 35mK ($F/1, 12\text{ms}, 50\text{Hz}$)	生产
	a-Si	320×240	25	NETD = 63mK (7ms)	已验证
Raytheon 商用红外公司	a-Si	160×120 ($7 \sim 14\mu\text{m}$)	46.8	NETD = 63mK ($F/1, 30$ 或 60Hz)	生产
日本 Mitsubishi 电子公司	SOI 二极管	320×240	40	NETD = 120mK ($F/1, 30\text{Hz}$)	
	SOI 二极管	640×480	25	NETD = 40mK ($F/1$)	正在研制
	YBaCuO	320×240	40	NETD = 80mK ($F/1$)	首个样品
韩国高级科学技术研究所	SOI 二极管			$1.2 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$	正在研制

3 其他非制冷 FPA 红外探测器技术的进展

3.1 SOI 二极管非制冷 IRFPA 探测器

这种探测器技术利用半导体 PN 结具有良好的温度特性(偏压固定时二极管电流随结温度的升高呈幂指数增加)制成温度传感器,是在绝缘体基上外延硅,这样在硅—绝缘体 (Silicon-on-insulator, SOI) 层中形成了 PN 结二极管。与上述探测器材料不同,PN 结为单晶体,可以完全采用硅大规模集成电路工艺,非常适合大批量生产。目前研究此项技术的有日本 Mitsubishi 电子公司和韩国高级科学技术研究所。

日本 Mitsubishi 电子公司于 1999 年就制作出 20×240 元阵列,敏感元为若干二极管的串联结构,像元尺寸为 $40\mu\text{m} \times 40\mu\text{m}$, 填充因子可提高到 90%, 红外吸收率为 80%, 其他指标见表 1。由于采

用 SOI 技术,探测器的热导很低,使探测器的性能大为提高。2005 年他们研究的 640×480 元 SOI 二极管探测器,如图 3 所示。在吸收结构和臂之间安装了独立的红外反射层,使红外吸收超过 80%,响应率不均匀性 $<0.9\%$ 。由于 SOI 制作工艺尚不成熟,制作成本较高,利用此技术达到生产还不置可否。研究结果见表 1 中所列。

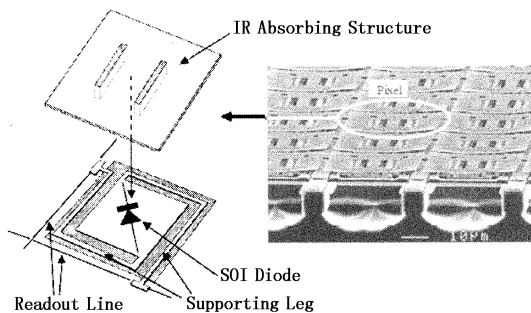


图 3 SOI 二极管非制冷 IRFPA

3.2 新型热机械非制冷红外焦平面阵列

在热机械非制冷红外探测器中,有一种新型双材料微悬臂梁探测器,它利用的是机械力学性质原理探测红外辐射,20 世纪 90 年代末开始出现。其工作原理是:两种膨胀系数相差较大的材料,当温度升高时两种材料之间产生大的应力差,使得微悬臂梁发生形变,可用电容、光学、压阻或电子隧穿等极高灵敏度方法读出,并与常规电路如 CMOS 和 CCD 100% 兼容。

双材料微悬臂梁非制冷红外探测器的噪声等效温差 (NETD) 非常小,理论值可以达到零点几毫开尔文。据报道,R. Amantea 等人在电容读出方式下实现了 NETD 为 5mK 的结果,比一般的非制冷探测器低 1 个数量级,这与制冷光子型红外探测器的 NETD 相当,将满足高灵敏度、轻质和低成本的要求。国外主要研究单位有美国 Oak Ridge (橡树岭) 国家实验室、加利福尼亚大学、美国 Sarcon 微系统公司等^[5]。

2003 年,美国 Sarcon 微系统公司应用标准集成电路工艺制作 320×240 元双材料微悬臂梁 IRFPA,像元间距 $50\mu\text{m}$ 。其中低热膨胀系数材料为 $\alpha\text{-SiC:H}$,高膨胀系数材料为 Au,电容温度系数达到 20% 以上,NETD $<5\text{mK}$,热时间常数为 $5 \sim 10\text{ms}$ ^[6]。

美国 Oak Ridge 国家实验室和田纳西州大学合作一直在研究双材料微悬臂梁探测器,2006 年制作出 256×256 元 IRFPA,结构如图 4 所示^[7],选择的

材料为 SiN_x 和 Au。其 NETD 较高,这是因为没有采用低噪声的读出元件。现在已经得到用这种阵列制作的红外热像仪。

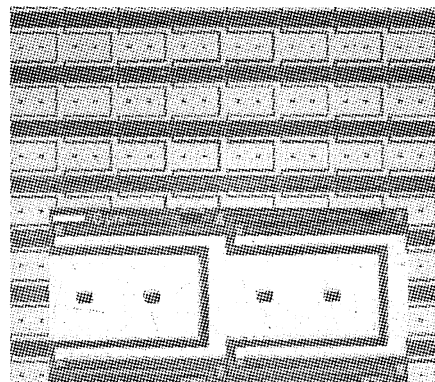


图 4 256×256 元 IRFPA 结构

目前,光学读出已经开始成为新型非制冷 IRFPA 探测器的关键技术之一,原因在于光学读出是非接触式的,无需电学连接,因此降低了电噪声^[6],也使得噪声等效温差降低。其原理是:用一束激光照射在 IRFPA 探测器上,当 IRFPA 探测器吸收红外辐射时,其温度发生变化而引起形变,则激光束在 IRFPA 探测器上的位置发生移动,反射的激光再落到 CCD 或 CMOS 相机上被读出,从而探测到红外信号。光学读出可使器件体积更小、携带更方便,因此具有光学读出方式的微悬臂梁非制冷探测器是非制冷探测器的一个重要发展方向。美国 Oak Ridge 国家实验室和田纳西州大学设计的双材料微悬臂梁探测器 FPA 为 256×256 元 SiN_x/Al ,就采用两种非接触光学方式读取信号。

新型热机械非制冷红外探测器正处于研制之中,其应用前景看好,但技术上还存在一些问题,如探测器中存在固有的机械噪声。

3.3 基于光学读出的热电光非制冷红外探测器^[8]

这种非制冷探测器的敏感元件是一种以顺电相工作的电光晶体。其工作原理是:当晶体处于临界相变温度 T_c 以上时,晶体是各向同性的,其折射率在各个方向相同。但是加电场时,晶体会出现双折射效应,而且双折射大小与温度变化有关,因此可探测红外辐射。

以色列 Normal 技术公司和 Jerusalem 的 Hebrew 大学正在研制这种非制冷红外探测器,并将光学读出技术应用其中,预计可达到理论极限值。

作为传感元的晶体应具有高的电光效应,以色

列 Normal 技术公司选择钽铌酸钾锂 (KLTN)。采用金属有机物化学汽相沉积 (MOCVD) 生长 KLTN 薄膜。KLTN 薄膜不仅与体单晶有相同的物理特性,而且组分均匀。目前,以色列 Normal 技术公司还在不断从事组分优化研究,以期这种材料得到应用。

实验用蓝色激光作为读出光源,吸收层为 SiN 材料。预计这种探测器的填充因子很高,能在 90% 以上。虽然目前还未得到实用的探测器,但通过理论计算,其 NETD 可达到以下目标:

$$(\text{NETD})_{50\mu\text{m}} = 5\text{mK}$$

$$(\text{NETD})_{25\mu\text{m}} = 12\text{mK}$$

3.4 新型热光非制冷红外探测器^[9]

美国 Aegis 半导体公司利用半导体的热光效应对红外光进行探测,采用该技术推动其低成本非制冷红外探测器的应用。红外焦平面探测器由热可调谐薄膜滤光片像元组成,每个热像元相当于一个波长转换器,可将远红外辐射信号转换为近红外信号后,用现有 CCD 和 CMOS 相机进行探测。这种探测器的研制成功将大大影响红外探测器的市场价格。但就目前来看,规格 160 × 120 元探测器(像元合格率 > 99.9%,填充因子 > 92%,温度系数为 6%/K)的 NETD 较大,不能满足军用要求,但可在民用市场如视频安全及汽车夜间辅助驾驶等方面得到使用。

4 发展趋势

非制冷 IRFPA 探测器已经成为国际上研究的热点之一,美国 Raytheon 公司、法国 Sofradir 公司等已经可以生产各种规格的非制冷 IRFPA 探测器,并用于各种军用或民用的红外系统中,且有逐年增加的趋势。

目前非制冷红外探测器采用的原理、结构和工艺与制冷光子型 IRFPA 探测器不同,是将吸收的红外辐射(热能),转化成对热敏感的电势、几何结构(形变)等物理量进行读出,实现红外探测。通过技术上的不断改进和提高,可能会有更好的提高 IRFPA 探测器性能的方法。就目前来看,还处于研究阶段的热机械双材料微悬臂梁红外探测器和热电光红外探测器,由于它们的噪声等效温差 (NETD) 非常接近制冷光子型探测器的 NETD,因此将有可能成为新一代 IRFPA 探测器发展方向之一。

非制冷红外探测器的探测率目前还不及光子型 IRFPA 探测器高,已装备的非制冷红外热像仪的 NETD 通常为 20 ~ 100mK,所以采用低成本、高性能

的非制冷红外探测器用于中、低端的军用和民用系统应该是目前最好的选择。

非制冷红外探测器最终达到的目标应是:

(1) 与标准集成电路兼容,实现大规模的生产;

(2) 在同等面积上,像元尺寸减小,但性能提高,以达到缩小尺寸、降低成本的目的;

(3) 优化材料和结构,提高 IRFPA 探测器的吸收率和填充因子;

(4) 发展低成本一次性非制冷红外探测器,扩大军民两用范围;

(5) 采用噪声小的激光进行光学读出;

(6) 接近 NETD 理论极限值的双材料微悬臂梁非制冷红外探测器和热电光红外探测器技术研究向高端军用方向发展;

(7) 缩短响应时间,发展快速响应的非制冷红外探测器;

(8) 同时发展中波非制冷红外探测器,部分替代成本较高的 InSb 和 HgCdTe IRFPA 探测器。

参考文献:

- [1] 李颖文,等. 非制冷热成像最新发展和应用前景[J]. 红外与激光工程,2005,6:257-260,280.
- [2] J. Murphy, et al. High sensitivity 25 μm microbolometer FPAs[J]. SPIE,2002,4721:99-111.
- [3] D. Murphy, et al. High sensitivity 640 × 512 (20 μm pitch) microbolometer FPAs [J]. SPIE, 2006, 6206: 62061A.
- [4] Shigeru Tohyama, et al. New thermally isolated pixel structure for high-resolution uncooled infrared FPA [J]. SPIE,2004,5406:428-436.
- [5] 郭方敏,等. 双材料微悬臂非制冷红外探测成像系统[J]. 红外,2004,11:14-20.
- [6] Scott R. Hunter, et al. High-sensitivity uncooled microcantilever infrared imaging arrays [J]. SPIE, 2003, 5074: 469-480.
- [7] N. V. Lavrik, et al. Uncooled infrared imaging using bi-material microcantilever arrays [J]. SPIE, 2006, 6206: 62061k.
- [8] Lavi Secundo, et al. Uncooled FPA with optical reading: reaching the limit[J]. SPIE,2005,5783:483-495.
- [9] Ming Wu, et al. Novel low-cost uncooled infrared camera [J]. SPIE,2005,5783:496-505.
- [10] A M Filachev, et al. Infrared focal plane arrays: state of the art and development trends [J]. SPIE, 2003, 5126: 52-85.